

## 원형소재를 이용한 프로파일 다단 형상인발 공정설계

이인규<sup>1,2</sup> · 최창영<sup>1</sup> · 이상곤<sup>#</sup> · 정명식<sup>1</sup> · 이재욱<sup>1</sup> · 김다혜<sup>1</sup> · 조용재<sup>1</sup> · 김병민<sup>2</sup>

### Process Design for Multi-pass Profile Drawing using Round Materials

I. K. Lee, C. Y. Choi, S. K. Lee, M. S. Jeong, J. W. Lee, D. H. Kim, Y. J. Cho, B. M. Kim

(Received January 20, 2015 / Revised May 8, 2015 / Accepted June 18, 2015)

#### Abstract

Multi-pass shape drawing is very important to produce steel profiles in round samples. In the current study, a process design system is developed for a multi-pass shape drawing. In general, the number of passes for a multi-pass shape drawing is 2 to 3 when the reduction ratio, drawing stress, and productivity are considered. Therefore, calculating the drawing stress and designing the intermediated die shapes are very important. In order to calculate the drawing stress, a shape drawing load prediction method is proposed using a general axisymmetric drawing load prediction model. An intermediate die shape design method is proposed using the initial and the final product shapes. Based on this analysis, a process design system is developed for multi-pass shape drawing for steel profiles. The system works with AutoCAD. The system was applied to design a shape drawing of a spline.

**Key Words** : Multi-pass Shape Drawing, Drawing Load, Drawing Stress, Process Design System, Intermediated Die Shape

### 1. 서론

인발공정은 소재를 원하는 단면형상의 다이를 통과시켜 길이가 긴 제품을 성형하는 공정으로 다단 형상인발은 2 개 이상의 다이를 통과시켜 제품을 성형하는 공정이다[1]. 인발공정의 경우 소재 이용률이 매우 높고, 제품의 기계적 성질이 매우 우수한 장점이 있다[2,3]. 다단 형상인발공정은 단면형상이 복잡한 프로파일(profile) 제조에 주로 적용되는 공정으로 원하는 품질을 가진 최종제품을 성형하기 위해서는 적합한 공정설계가 반드시 이루어져야만 한다. 다단 형상인발 공정설계 시 초기 소재직경, 패스 수, 중간 패스 다이 단면형상설계가 매우 중요하다. 현재 까지 이러한 다단 형상인발 공정설계는 대부분 현장 작업자의 노하우에 의존하여 이루어지고 있기

때문에 체계적인 설계기술이 확보되어 있지 않다. 따라서 공정설계 효율향상을 위해서는 보다 체계적인 공정설계 기술이 확보되어야만 한다.

최근까지도 형상인발공정에 대한 몇몇 연구들이 수행되었다. Brücker 등은 프로파일 생산을 위한 다단 인발공정 전문가 시스템을 개발하였다[4]. Kim 등은 인발응력을 고려한 다단 형상인발 공정설계를 하였으며[5], Kim 등은 인발응력을 고려한 다단 형상인발 공정설계에 관한 연구를 수행하였다[6].

프로파일 제조공정은 최종제품의 단면형상 난이도에 따라 두 가지로 분류 가능하다. 단면형상이 비교적 단순한 제품은 초기 소재에서 바로 형상인발 공정을 적용하여 제조된다. 그러나, 단면형상이 상대적으로 복잡한 제품은 형상압연공정을 통해 최종 제품과 유사한 형상으로 성형한 후 형상인발공정이

1. 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹

2. 부산대학교 기계공학부

# Corresponding Author: Ultimate Manufacturing Technology Group,  
E-mail: sklee@kitech.re.kr

적용된다[7].

본 연구에서는 초기원형소재에 형상인발만 적용하여 최종제품을 제조하는 공정에 대한 공정설계 방법을 제안하였다. 효과적인 다단 형상인발 공정설계를 위한 AutoCAD 에서 구동되는 공정설계 시스템을 개발하였으며, 개발된 공정설계 시스템은 각 패스의 인발하중(drawing load)과 인발응력(drawing stress) 예측이 가능하며, 중간 패스 다이 단면형상설계가 가능하다. 개발된 시스템을 이용하여 스플라인(spline) 다단 형상인발 공정설계를 수행하였다.

## 2. 형상인발 하중 및 응력 계산

인발공정 설계를 위해서는 인발하중 및 응력 예측이 선행되어야만 한다. 본 연구에서는 이전 연구에서 제안된 단면요소분할법을 이용하여 형상인발공정 하중 및 응력을 예측하였다[8]. 단면요소분할법은 기존 축대칭 인발하중 예측모델을 이용하여 형상인발하중을 예측할 수 있다. Fig. 1에서 보듯이 형상인발공정을 중심각이 매우 작은 요소로 분할한 후 각 요소의 인발하중을 구한 후 모두 더하면 형상인발공정의 하중을 계산할 수 있다. 분할된 요소의 인발하중은 식(1)로 계산된다.

$$SL_i = AL_i \times (\theta_i / 2\pi) \quad (1)$$

여기서,  $SL_i$ 는  $i$  번째 요소의 인발하중,  $AL_i$ 는 축대칭인발하중으로 계산된 인발하중, 그리고  $\theta_i$ 는  $i$  번째 요소의 중심각이다.

본 연구에서는 A. Geleji 가 제안한 식(2)의 모델을 이용하여 축대칭인발하중을 예측하였다[9].

$$Z_i = k_{m,i}(F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm,i} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (2)$$

여기서,  $Z_i$ 는  $i$  번째 요소에 상응하는 전체 축대칭인발하중,  $k_{m,i}$ 는 소재의 평균변형저항,  $k_{fm}$ 은 평균변형강도,  $F_i$ 는 다이 입/출구에서의 소재 단면적 차이,  $Q_i$ 는 소재와 다이의 접촉면적,  $\mu_i$ 는 마찰계수,  $f_{2,i}$ 는 다이 출구부의 소재 단면적, 그리고  $\alpha_i$ 는 다이 반각이다.

따라서 전체 형상인발하중과 인발응력은 다음의 식(3)과 식(4)로 계산된다.

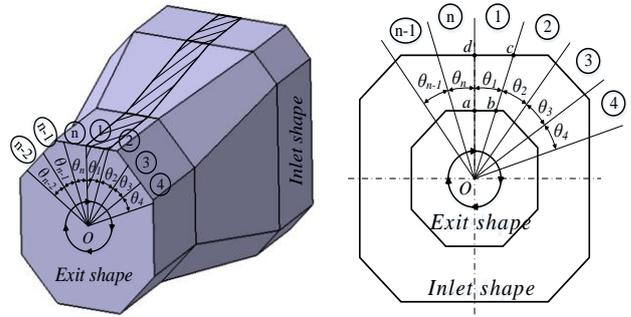


Fig. 1 Divided shape drawing process

$$SL_{total} = \sum_{i=1}^n SL_i \quad (3)$$

$$\sigma = SL_{total} / A_i \quad (4)$$

여기서,  $A_i$ 는 출구부 제품의 단면적이다.

## 3. 공정설계 시스템

### 3.1 공정설계 절차

공정설계에 앞서 형상압연공정의 필요 여부를 판단하기 위한 기준이 필요하다. 본 연구에서는 식(5)로 표현되는 형상계수(shape factor)를 이용하여 형상압연공정 필요 여부를 결정하였다[8].

$$SF = P^2 / A \quad (5)$$

여기서,  $P$ 는 프로파일의 둘레길이,  $A$ 는 프로파일의 단면적이다. 형상계수가 27 이상이면 형상압연이 요구되며, 27 미만인 경우 형상인발로 성형이 가능하다.

본 연구에서는 다단 형상인발 공정설계 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 범용 소프트웨어인 AutoCAD 기반으로 개발되어 AutoCAD 의 모듈로 설치하여 구동이 된다. Fig. 2에 개발된 공정설계 시스템의 설계 절차를 나타내었다.

공정설계를 위해 먼저 최종 제품의 형상을 인식한 후 단면적, 둘레길이, 형상계수, 도심을 계산한다.

이후 적용되는 소재를 선택한다. 개발 시스템에는 인장시험을 통해 확보된 소재물성치가 D/B 화 되어 있으며 새로운 소재는 인장시험을 통해 물성치 추가가 가능하다.

다음은 초기 소재 직경을 결정하게 된다. 초기소재는 최종제품의 최소 외접원보다는 반드시 커야만 하며, 사용자가 직접 입력하여 초기 소재를 설정한

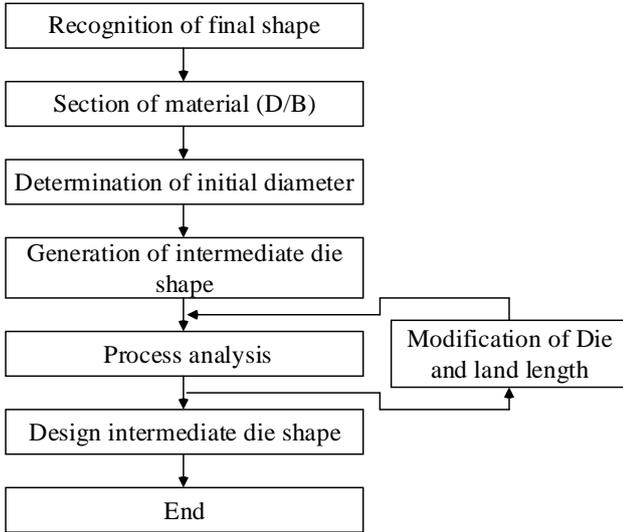


Fig. 2 Flowchart of design system

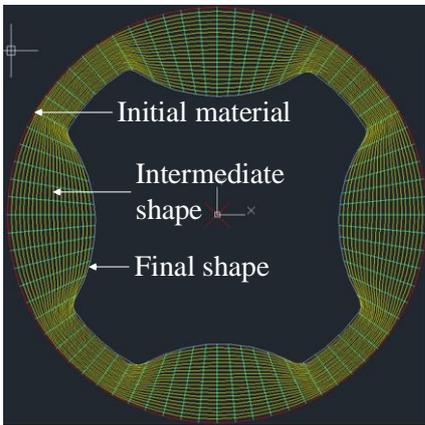


Fig. 3 Intermediate die shape

다. 초기소재 직경은 현장 노하우를 토대로 최종제품의 최소 외접원보다 패스당 약 1.5~2.0mm 커야만 한다[4].

다단 형상인발 공정설계 시 가장 중요한 것은 중간패스 다이형상 설계이다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제안한 가상금형을 이용한 중간패스 다이형상 설계방법을 적용하였다[10]. Fig. 3에서 보듯이 초기소재와 최종제품 사이를 등간격으로 분할하면 다양한 모양의 다이 단면형상을 확보할 수 있다. 본 시스템에서는 각 중간패스 형상들에 대한 단면감소율(reduction in area, RA(%))을 계산한 후 이를 고려하여 중간패스 다이형상을 선정한다. 단면감소율은 다음의 식(6)으로 계산된다.

$$RA_i = F_i / f_{1,i} \times 100 \quad (6)$$

여기서,  $F_i(=f_{1,i} - f_{2,i})$ 는 다이 입구와 출구에서의 소재 단면적 차, 그리고  $f_{1,i}$ 는 다이 입구부의 소재 단면적이다.

중간패스 다이형상이 결정되면 공정해석을 수행하여 인발하중, 인발응력, 그리고 식(7)로 계산되는 평균 변형률(average strain,  $\epsilon_a$ ) 등을 계산한다.

$$\epsilon_a = \ln(f_{1,i} / f_{2,i}) \quad (7)$$

계산결과를 토대로 다이 및 다이 랜드 길이를 수정하여 공정해석을 반복수행 한 후 최종 중간패스 다이형상을 결정하게 된다.

### 3.2 공정설계 프로그램

설계절차를 반영하여 공정설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 AutoCAD에 설치되어 활용이 가능하며, Fig. 4에 개발된 프로그램을 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 개발된 프로그램은 최종제품 정보 창(information of final product), 초기소재 정보 창(information of initial material), 가상금형 조건 입력 창(virtual input date), 생성된 가상금형 정보 창(information of virtual die), 다이 및 랜드 길이 수정 창(modification of die and land length), 설계된 공정 정보창(information of designed drawing process), 공정 정보 창(process information window), 그리고 후처리 창(post process)로 구성되어 있다.

최종소재 정보창은 선택된 최종제품 형상의 면적, 둘레길이, 형상계수, 도심을 계산한다. 초기소재 정보창에서는 소재 D/B로부터 초기소재 재질 선정, 열처리 적용 유/무, 마찰계수, 초기소재 직경, 초기소재 면적, 총단면 감소율이 계산된다. 가상금형 조건 입력창에서는 가상금형 생성을 위한 조건을 입력한다. 이후 입력된 정보로 가상금형을 생성하면 가상금형 정보창에 생성된 가상금형의 정보들이 출력되며, 출력된 정보를 토대로 중간패스 다이형상을 선정하게 된다. 이후 공정정보창에서는 설계된 각 패스의 감소율, 인발하중, 인발응력, 다이 반각, 다이 길이, 랜드 길이가 출력된다. 후처리 창에서는 Fig. 5에서 보듯이 설계된 각 패스 형상 및 공정정보가 AutoCAD로 출력된다. 또한 설계된 상세 공정정보는 마이크로소프트 엑셀(excel) 파일로 저장이 가능하다. Fig. 6에 출력된 데이터를 나타내었다.

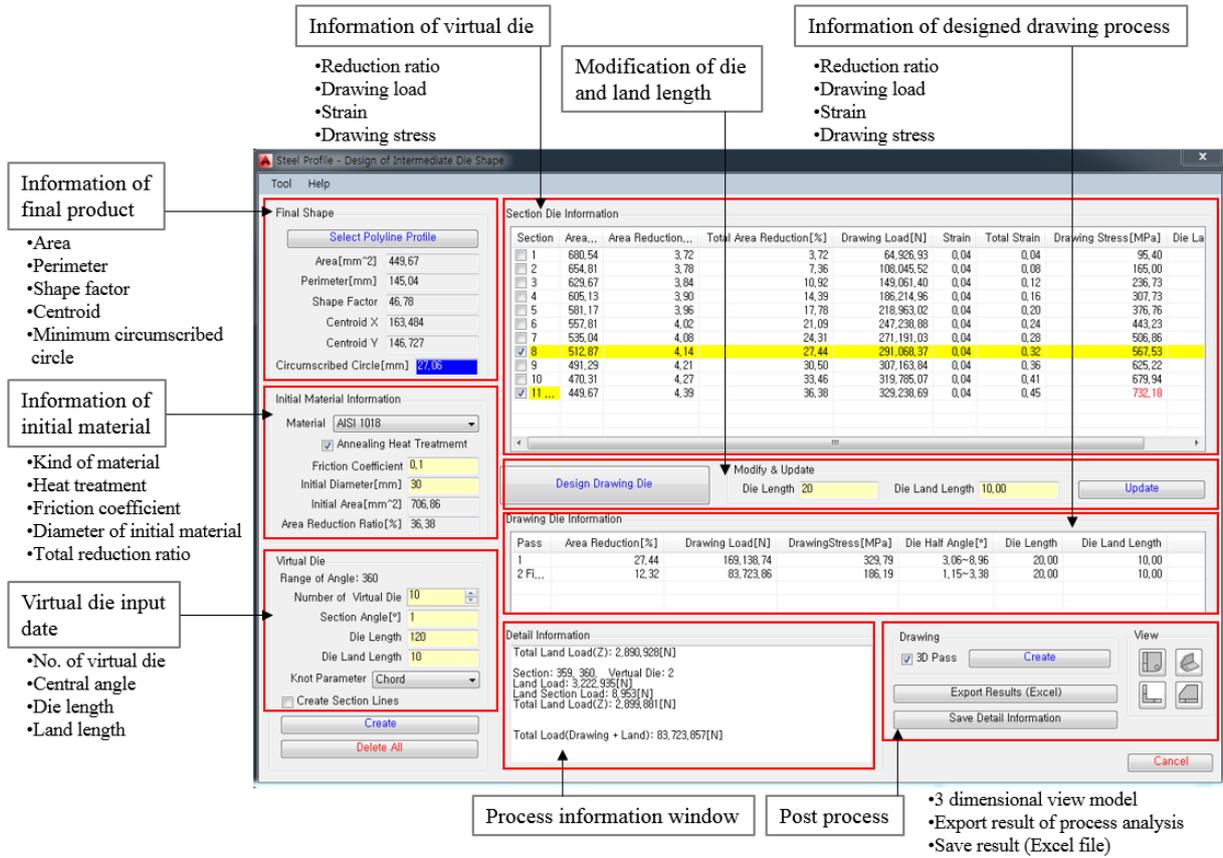


Fig. 4 Shape drawing process design system



Fig. 5 Post process

Drawing Die Information							
User Name		Administrator					
Created Date		2014-10-13 오후 12:00:00					
Final Shape Information				Initial Material Information			
Profile Area(mm <sup>2</sup> )	66.16	Material	AISI 1018				
Perimeter(mm)	30.92	Annealing Heat Treatment	YES				
Shape Factor	14.45	Friction Coefficient	0.06				
Centeroid X	147.967	Initial Diameter(mm)	13				
Centeroid Y	-26.832	Initial Area(mm <sup>2</sup> )	132.73				
Circumscribed Circle(mm)	11.48	Total Area Reduction(%)	50.16				
Virtual Die Design							
Number of Virtual Die	3						
Interval of Angle	1						
Section Information							
Section	Area(mm <sup>2</sup> )	Area Reduction(%)	Total Area Reduction(%)	Drawing Load[N]	Strain	Total Strain	Drawing Stress(MPa)
1	123.99	6.58	6.58	18,982.98	0.07	0.07	153.1
2	115.59	6.78	12.92	32,126.98	0.07	0.14	277.94
3	107.52	6.98	18.99	43,015.10	0.07	0.21	400.06
4	99.79	7.19	24.82	51,419.49	0.07	0.29	515.29
5	92.39	7.41	30.39	57,512.33	0.08	0.36	622.49
6	85.33	7.64	35.71	61,569.59	0.08	0.44	721.55
7	78.6	7.88	40.78	63,882.69	0.08	0.52	812.72
8	72.21	8.13	45.59	64,728.71	0.08	0.61	896.34
9 Final Shape	66.16	8.38	50.16	64,360.83	0.09	0.7	972.81
Pass Information							
Pass	Area Reduction(%)	Drawing Load[N]	Drawing Stress(MPa)	Die Half Angle[°]	Die Length	Die Land Length	
1	30.39	54,112.43	585.69	0.36-1.40	66.67	10.00	
2 Final Shape	28.39	36,281.67	548.39	0.36-1.40	53.33	10.00	

Fig. 6 Exported data (Microsoft Excel file)

### 4. 스플라인 형상인발 공정설계

개발된 공정설계 시스템을 이용하여 조향장치용 스플라인 샤프트 이형인발 공정설계를 수행하였다. Fig. 7 에서 보듯이 적용된 스플라인은 가장자리에 16 개의 치형을 가진 기어형상의 제품이다.

적용 소재는 AISI 1018 로 소재 D/B 에 저장되어 있는 물성치는 Table 1 과 같다.

Fig. 8 은 공정설계결과를 나타낸 것이다. 초기 소재직경은 30.0mm, 총단면감소율은 약 34.4% 이다.

2 패스 인발공정으로 설계를 하였으며, 생성된 가상금형 정보창에서 중간 패스 다이형상을 선정하였다. Fig. 8 에서 보듯이 8 번째 생성된 가상금형을 중간 패스 다이형상으로 선정하였다. 그 결과 첫 번째 패스와 두 번째 패스의 공정정보는 Table 2 와 같다.

후처리를 통해 AutoCAD 로 출력되는 공정정보를 Fig. 9 에 나타내었다. 후처리를 통해 감소율, 인발하중, 그리고 금형 내에서의 소재 변형양상을 확인할 수 있다.

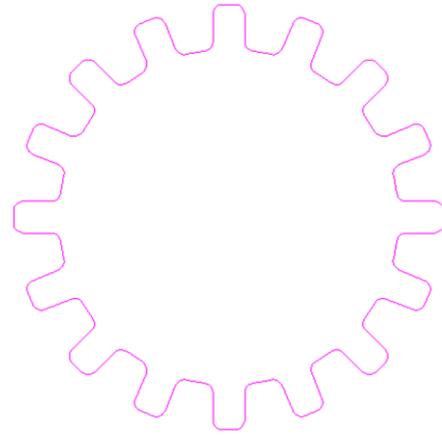


Fig. 7 Cross section of spline

Table 1 Material properties of AISI 1018

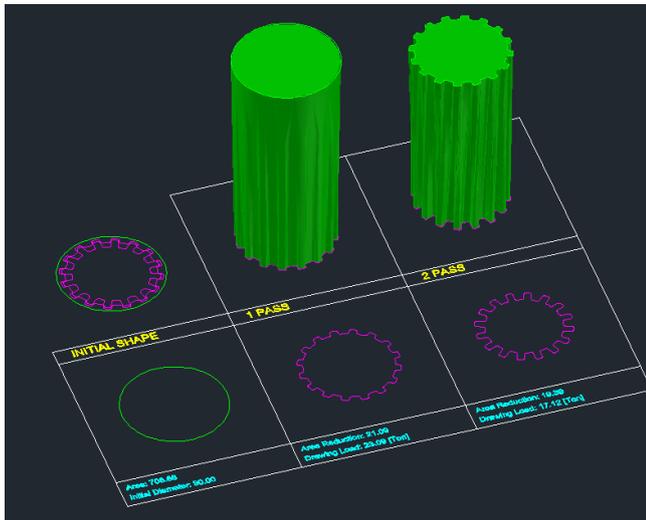
YS[MPa]	TS[MPa]	K-value[MPa]	n-value
700.0	850.0	947.0	0.262

The screenshot displays the 'Steel Profile - Design of Intermediate Die Shape' software interface. It includes several panels: 'Final Shape' with properties like Area (449.67 mm²) and Perimeter (145.04 mm); 'Initial Material Information' set to AISI 1018; 'Section Die Information' table with 11 rows; 'Drawing Die Information' table with 2 rows; and 'Detail Information' showing total land load (2,890,928 N) and section details (Section: 359, 360; Virtual Die: 2; Land Load: 3,222,935 N).

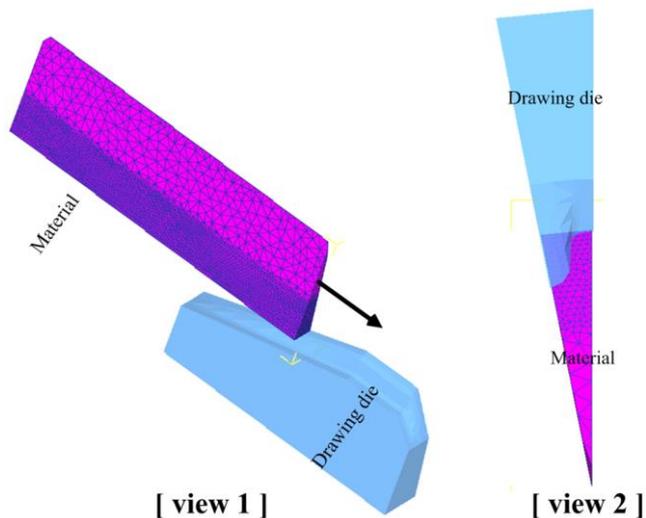
Fig. 8 Result of process design

**Table 2 Result of process analysis**

Pass No.	Reduction in area(%)	Drawing Load(kN)	Drawing Stress(MPa)	Half die angle(°)
1	27.4	169.1	330.0	3.06~8.96
2	12.3	83.7	186.1	1.15~3.38



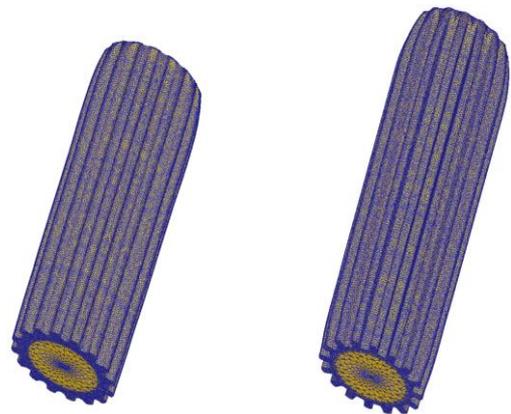
**Fig. 9 Post process (in AutoCAD)**



**Fig.10 FE analysis model (1/32 section)**

설계된 공정의 타당성을 검증하기 위하여 강소성 유한요소해석을 수행하여 인발하중을 비교하였다. Fig. 10 에 해석모델을 나타내었다. 해석은 최종제품 단면의 대칭을 고려하여 1/32 단면에 대하여 수행하였다.

Fig. 11 은 유한요소해석결과 각 패스에 따른 소재



(a) after 1<sup>st</sup> pass (b) after 2<sup>nd</sup> pass  
**Fig.11 Deformed shape of spline**

**Table 3 Comparison of drawing load(kN)**

Pass No.	Designed analysis	FE analysis
1	169.1	158.6
2	83.7	77.0

의 변형 형상을 나타낸 것이다. 해석결과 양호한 치형을 가진 스플라인 성형이 가능하였다. Table 3 은 공정설계와 유한요소해석결과 각 패스별 인발하중을 나타낸 것이다. Table 3 에서 알 수 있듯이 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 이를 통해 공정설계의 타당성을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 프로파일 다단 형상인발공정설계 기술을 개발하였다. 형상인발공정의 경우 하중예측이 어렵다. 본 연구에서는 단면을 분할하여 형상인발하중을 계산하는 방법을 이용하여 형상인발공정 하중과 인발응력을 예측하였다. 또한 AutoCAD 에서 구동되는 형상인발 공정설계시스템을 개발하였다. 개발된 공정설계시스템은 최종 인발제품의 형상을 토대로 초기 소재직경을 결정한다. 다단 패스 형상인발의 중간 패스 다이 단면형상은 초기 소재와 최종제품 사이에 생성되는 다양한 단면형상과 단면감소율을 이용하여 결정된다. 공정설계가 완료되면 AutoCAD 에 다이 단면형상 및 제품의 변형양상이 출력되며, 단면감소율, 변형률, 인발하중 및 인발응력 등 다양한 공정정보들을 확인할 수 있으며, 이러한 정보는 별도의 마이크로소프트 엑셀 파일로 저

장이 된다. 치형을 가진 스플라인 제품에 대한 공정 설계를 실시하였으며 설계된 공정에 대한 강소성 유한요소해석을 통해 인발하중을 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

지금까지 형상인발 공정설계는 대부분 현장작업자의 노하우에 의존하여 설계가 되었지만 개발된 공정설계 시스템을 활용할 경우 경험이 적은 사용자도 효과적인 공정설계가 가능할 것으로 판단되며, 다단 형상인발 제품을 생산하는 업체에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] M. Kobayashi, 1988, The Present Situation of Cold Drawn Special Section, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [2] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple Drawing of Rails for Linear Motion Guide, Adv. Technol. Plast., Vol. 1, pp. 367~372.
- [3] T. K. Lee, J. E. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2008, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf.(editor: C. G Park), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 337~340.
- [4] M. Brücker, D. Keller, J. Reissner, 1988, Computer-Aided Drawing of Profiles from Round and Square Bar, Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 247~250.
- [5] S. M. Kim, S. K. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2011, Process Design Program for Multistage Profile Drawing from Round Material, J. Kor., Soc., Precis. Eng., Vol. 28, No. 3, pp. 377~382.
- [6] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, B. M. Kim, M. S. Jeong, S. B. Lee, 2012, Process Design of Multi-pass Shape Drawing Considering the Drawing Stress, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 4, pp. 265~270.
- [7] K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, pp. 14~23.
- [8] S. K. Lee, J. E. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, Process Design of Multi-Stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide, J. Kor., Soc., Precis. Eng., Vol. 26, No. 11, pp. 124~130.
- [9] A. Geleji, 1960, Bildsame Formung der Metalle in Rechnung und Versuch (II), Berlin, Akademie Verlag.
- [10] S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2010, Development of Intermediate Die Shape Design Program for Multi-Pass Shape Drawing by using VisualLISP, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 4, pp. 242~247.